

Adaptasi Kardiorespirasi terhadap Program Latihan Fisik Berbasis Energi Aerobik dan Anaerobik pada Atlet: Tinjauan Peran Ventilasi, Difusi Paru dan *Inspiratory Muscle Training*

Cardiorespiratory Adaptation to Aerobic and Anaerobic-Based Physical Training Programs in Athletes: A Review on The Role of Ventilation, Pulmonary Diffusion, and Inspiratory Muscle Training

Irvan Abdillah¹, Arif Wicaksono², Pungguh Sutapa³, Prijo Subdibjo⁴

^{1,2,3,4} Progam Studi Ilmu Keolahragaan, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

Email Korespondensi: irvanabdillah.2025@student.uny.ac.id

Accepted: January, 10th 2026; Received: February, 27th 2026; Published: Juny, 30th 2026

Abstrak

Kajian yang mengintegrasikan adaptasi ventilasi, difusi paru, transportasi gas, dan *Inspiratory Muscle Training* (IMT) dalam kerangka kategorisasi energi latihan pada atlet Indonesia masih sangat terbatas. Artikel ini bertujuan meninjau secara terintegrasi adaptasi kardiorespirasi akibat program latihan fisik pada atlet berbagai cabang olahraga serta implikasinya terhadap performa. Metode yang digunakan adalah *narrative review* dengan seleksi literatur sistematis mengacu prinsip PRISMA 2020, melalui pencarian di PubMed, Scopus, dan Google Scholar rentang 2019–2025. Populasi kajian adalah atlet aktif dari cabang olahraga ketahanan, kekuatan, dan campuran tingkat remaja maupun dewasa. Sampel ditentukan menggunakan *purposive sampling* berdasarkan relevansi topik, menghasilkan 10 artikel yang memenuhi kriteria inklusi. Analisis data dilakukan secara tematik-naratif berdasarkan lima tema adaptasi utama. Hasil menunjukkan bahwa latihan aerobik meningkatkan efisiensi ventilasi ($\dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2}$), kapasitas difusi paru (DLCO/TLCO), dan kapasitas transportasi oksigen (peningkatan massa hemoglobin 10–20%; $\dot{V}O_{2max}$), sedangkan latihan anaerobik dan IMT dominan meningkatkan kekuatan otot inspirasi (MIP) serta menunda aktivasi *inspiratory muscle metaboreflex*. *Exercise-induced arterial hypoxemia* (EIAH) dapat muncul pada atlet *endurance elite* akibat waktu transit kapiler yang singkat dan *V/Q mismatch*. Studi pada atlet Indonesia mengonfirmasi korelasi positif kapasitas vital paru dengan prestasi dan efektivitas IMT terhadap MIP serta $\dot{V}O_{2max}$ atlet remaja. Kesimpulannya, program terintegrasi yang menggabungkan latihan aerobik, HIIT, dan IMT merupakan strategi paling efektif untuk mengoptimalkan fungsi kardiorespirasi dan performa atlet; penelitian lanjutan berbasis data lapangan Indonesia dengan pengukuran multi-parameter respirasi secara bersamaan sangat dibutuhkan.

Kata Kunci: Adaptasi kardiorespirasi, *Inspiratory Muscle Training*, Kapasitas difusi paru, Latihan aerobik-anaerobik, Performa atlet

Abstract

Integrated reviews addressing ventilation, pulmonary diffusion, gas transport, and Inspiratory Muscle Training (IMT) within an aerobic-anaerobic energy framework particularly among Indonesian athletes remain scarce. This article aims to provide an integrated review of cardiorespiratory adaptations to physical training programs in athletes across various sports and their performance implications. A narrative review was conducted using systematic literature selection based on PRISMA 2020 principles, searching PubMed, Scopus, and Google Scholar (2019–2025). The study population comprised active athletes from endurance, strength, and mixed-profile sports at youth and adult levels. Samples were determined via purposive sampling based on topic relevance, yielding 10 articles meeting all inclusion criteria. Data were analyzed using a thematic-narrative approach across five major adaptation themes. Results indicate that aerobic training improves ventilatory efficiency ($\dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2}$), pulmonary diffusing capacity (DLCO/TLCO), and oxygen transport capacity (hemoglobin mass +10–20%; $\dot{V}O_{2max}$), while anaerobic training and IMT primarily enhance inspiratory muscle strength (MIP) and delay the inspiratory muscle metaboreflex. Exercise-induced arterial hypoxemia (EIAH) may emerge in elite endurance athletes due to shortened capillary transit time and V/Q mismatch. Studies on Indonesian athletes confirm positive correlations between vital capacity and athletic achievement, and IMT effectiveness in improving MIP and $\dot{V}O_{2max}$ in youth athletes. In conclusion, integrated programs combining aerobic training, HIIT, and IMT represent the most effective strategy for optimizing cardiorespiratory function and athletic performance; further research using simultaneous multi-parameter respiratory measurements in Indonesian athlete populations is strongly warranted.

Keywords: *Cardiorespiratory adaptation, Inspiratory Muscle Training, Pulmonary diffusing capacity, Aerobic-anaerobic training, Athlete performance*

1. Pendahuluan

Aktivitas fisik dalam konteks olahraga berprestasi menuntut respons dan adaptasi multisistem yang kompleks, di mana sistem respirasi menjadi komponen kritis dalam rantai pengiriman oksigen dari atmosfer menuju mitokondria otot aktif. Selama latihan intensitas tinggi, konsumsi oksigen ($\dot{V}O_2$) dapat meningkat 10–20 kali lipat dari kondisi istirahat, sehingga sistem respirasi harus mampu meningkatkan ventilasi, mempertahankan efisiensi difusi, dan mendukung transportasi gas secara bersamaan (Dominelli et al., 2024; Powers & Howley, 2022). Secara fisiologis, program latihan fisik pada atlet dapat dikategorikan berdasarkan dominasi jalur penyediaan energi, yakni latihan aerobik yang bertumpu pada fosforilasi oksidatif dan latihan anaerobik yang mengandalkan sistem fosfagen serta glikolisis cepat. Kategorisasi ini penting karena menentukan jenis stressor fisiologis yang diterima sistem respirasi: latihan aerobik berdurasi panjang menekankan kapasitas difusi dan efisiensi ventilasi, sedangkan latihan anaerobik intensitas tinggi lebih membebani kekuatan otot pernapasan dan kapasitas buffer asam-basa (Atakan et al., 2021; Striga, 2024).

Dari perspektif komponen biomotorik, klasifikasi olahraga berdasarkan karakteristik energi dan tuntutan fisiologis menjadi landasan penting untuk memahami pola adaptasi respirasi. Olahraga ketahanan (*endurance*) seperti lari jarak jauh, renang, dan bersepeda menempatkan tuntutan terbesar pada sistem kardiorespirasi, dicirikan oleh kebutuhan $\dot{V}O_2$ tinggi dan *sustained*, pergeseran *enduranceventilatory threshold* (VT1 dan VT2), serta kebutuhan efisiensi ventilasi ($\dot{V}E/\dot{V}CO_2$) yang superior (Kasiak et al., 2024; Squeo et al., 2025). Sebaliknya, olahraga berbasis kekuatan dan *power* seperti taekwondo, pencak silat, gulat, dan atletik nomor sprint menempatkan beban ventilasi yang lebih episodik namun dengan akumulasi CO_2 dan laktat yang sangat cepat (Kowalski et al., 2024). Olahraga dengan profil campuran (*mixed*) seperti bola basket, sepak bola, dan tinju memiliki tuntutan kardiorespirasi intermiten yang memerlukan kemampuan pemulihan ventilasi yang tinggi (Squeo et al., 2025). Pemetaan ini menjadi dasar pemahaman bahwa respons struktural dan fungsional sistem respirasi tidak bersifat seragam, melainkan bergantung pada profil latihan yang dominan pada masing-masing cabang olahraga.

Adaptasi kronis sistem respirasi akibat latihan jangka panjang mencakup tiga lapisan utama yang saling terkait. Pertama, adaptasi ventilasi berupa peningkatan efisiensi ventilasi menit ($\dot{V}E$) dan pergeseran *enduranceventilatory threshold* ke intensitas yang lebih tinggi; atlet *endurance* terlatih secara konsisten menunjukkan efisiensi $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ yang lebih baik dibandingkan populasi umum (Kasiak et al., 2024). Kedua, adaptasi difusi berupa peningkatan kapasitas difusi paru (DLCO/TLCO) melalui rekrutmen dan distensi kapiler alveolar; atlet akuatik seperti perenang bahkan menunjukkan DLCO 135–148% di atas nilai prediksi akibat kombinasi latihan dan mekanisme pernapasan spesifik dalam air (Brotto et al., 2024; García et al., 2021). Ketiga, adaptasi transportasi gas berupa peningkatan massa hemoglobin (10–20%) dan volume plasma yang memperbesar kapasitas angkut oksigen (Hauser et al., 2023). Pada atlet *endurance* elite, ketiga lapisan adaptasi ini dapat mencapai batasnya sehingga memunculkan fenomena *exercise-induced arterial hypoxemia* (EIAH) akibat waktu transit kapiler yang terlalu singkat dan *V/Q mismatch* (Dominelli, 2019).

Sebagai intervensi tambahan, *Inspiratory Muscle Training* (IMT) telah terbukti meningkatkan kekuatan otot inspirasi (*Maximal Inspiratory Pressure*/MIP) dan toleransi latihan melalui mekanisme atenuasi *inspiratory muscle metaboreflex*, yakni reduksi redistribusi aliran darah dari otot rangka ke otot pernapasan saat kelelahan, yang pada gilirannya memperpanjang waktu hingga kelelahan (*time to exhaustion*/TTE) (Langer et al., 2025; Qin et al., 2024). Studi pada pelari jarak menengah menunjukkan bahwa IMT berbasis *PowerBreathe* secara signifikan meningkatkan VO_2/kg , kekuatan inspirasi, dan menurunkan akumulasi asam laktat (Rożek-Piechura et al., 2025). Namun, efek IMT terhadap parameter spirometri standar (FVC/FEV₁) tetap bervariasi antar studi, dan konsistensi efeknya pada VO_{2max} atlet terlatih masih diperdebatkan (Carvajal-Tello et al., 2024; de Freitas et al., 2024).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji aspek-aspek tertentu dari adaptasi respirasi pada atlet. Dridi et al. (2021) menemukan bahwa latihan *endurance* intensitas tinggi meningkatkan DLCO secara signifikan pada atlet muda dibandingkan latihan intensitas sedang. Hauser et al. (2023) menunjukkan bahwa adaptasi massa hemoglobin terjadi secara proporsional dengan volume latihan aerobik kumulatif. Di konteks Indonesia, Tanzila & Febriani (2025) melaporkan korelasi positif antara kapasitas vital paru dan prestasi atlet di Sekolah Olahraga Nasional Sriwijaya, sementara Ratnaya et al. (2024) membuktikan bahwa latihan otot pernapasan meningkatkan MIP dan VO_{2maks} pada atlet remaja di Undiksha. Meski demikian, kajian-kajian

tersebut umumnya bersifat parsial dan hanya membahas satu komponen adaptasi pada satu cabang olahraga serta belum ada tinjauan yang secara bersamaan mengintegrasikan adaptasi ventilasi, difusi paru, dan peran IMT dalam kerangka kategorisasi energi latihan aerobik dan anaerobik, khususnya dalam konteks atlet Indonesia.

Kesenjangan inilah yang menjadi urgensi kajian ini. Tanpa pemahaman terintegrasi mengenai bagaimana jenis latihan berdasarkan dominasi energi memengaruhi ventilasi, difusi paru, dan respons terhadap IMT secara bersamaan, perancang program latihan dan praktisi olahraga di Indonesia kesulitan mengoptimalkan beban latihan secara individual dan berbasis bukti. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan menyajikan tinjauan terintegrasi mengenai adaptasi kardiorespirasi, mencakup ventilasi, difusi paru, transportasi gas, dan peran IMT pada atlet dari berbagai cabang olahraga berdasarkan kategorisasi dominasi energi aerobik dan anaerobik, dengan mempertimbangkan temuan dari konteks atlet Indonesia maupun literatur internasional terkini.

2. Metodologi

Penelitian ini merupakan narrative review yang dilakukan dengan prosedur seleksi literatur sistematis untuk memastikan kualitas dan relevansi sumber yang digunakan. Pendekatan narrative review dipilih karena heterogenitas desain studi dan variasi populasi atlet yang dikaji, sehingga sintesis naratif lebih sesuai dibandingkan meta-analisis kuantitatif (Ferrari, 2015).

Pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada tiga basis data utama, yaitu PubMed, Scopus, dan Google Scholar, pada rentang waktu Mei hingga Oktober 2025. Pencarian menggunakan kombinasi kata kunci terstruktur meliputi: respiratory adaptation, DLCO, pulmonary diffusing capacity, VO₂maks, *enduranceventilatory threshold*, *Inspiratory Muscle Training*, *exercise-induced hypoxemia*, *aerobic training athlete*, dan *athlete performance*. Kata kunci dikombinasikan menggunakan operator Boolean AND/OR untuk memperluas cakupan sekaligus mempertajam relevansi hasil pencarian.

Populasi kajian dalam penelitian ini adalah atlet aktif dari berbagai cabang olahraga yang mencakup olahraga ketahanan (*endurance*) seperti lari jarak jauh, renang, dan bersepeda; olahraga kekuatan dan *power* seperti taekwondo, angkat besi, dan atletik; serta olahraga dengan profil energi campuran. Tidak ada batasan usia atau jenis kelamin dalam pemilihan studi, namun studi yang menyertakan atlet remaja maupun dewasa terlatih diprioritaskan. Teknik pengambilan sampel literatur menggunakan *purposive sampling* berdasarkan relevansi topik terhadap fokus kajian, yaitu adaptasi kardiorespirasi akibat program latihan fisik. Total artikel yang memenuhi seluruh kriteria dan digunakan dalam sintesis adalah 10 artikel.

Seleksi artikel dilakukan secara ketat berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan sebelum pencarian dimulai. Kriteria lengkap disajikan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi Seleksi Artikel

Aspek	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Tahun publikasi	2019–2025	Di luar rentang 2019–2025
Bahasa	Inggris atau Indonesia	Selain Inggris/Indonesia
Desain studi	Studi eksperimental, RCT, <i>systematic review</i> , <i>meta-analisis</i> , <i>narrative review</i> <i>peer-reviewed</i>	Laporan kasus tunggal, opini tanpa data, preprint tidak terverifikasi
Populasi	Atlet aktif atau individu dengan program latihan fisik terstruktur	Populasi klinis, pasien dengan penyakit paru, individu sedentari tanpa intervensi latihan
Topik	Adaptasi ventilasi, difusi paru (DLCO/TLCO), transportasi oksigen (Hb mass/VO ₂ maks), dan/atau intervensi IMT	Topik di luar sistem respirasi atau tidak berkaitan dengan latihan fisik
Aksesibilitas	Teks lengkap tersedia	Teks lengkap tidak dapat diakses
Kualitas	Dipublikasikan di jurnal terindeks (Scopus/SINTA/PubMed)	Tidak terindeks atau tidak melalui proses <i>peer-review</i>

Data diekstraksi secara terstruktur mencakup: nama penulis, tahun publikasi, desain studi, karakteristik sampel, jenis intervensi atau protokol latihan, variabel respirasi yang diukur, dan temuan utama. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan analisis tematik-naratif, di mana artikel-artikel dikelompokkan berdasarkan lima tema adaptasi utama: (1) adaptasi ventilasi, (2) adaptasi kapasitas difusi paru, (3) adaptasi transportasi gas, (4) kontrol saraf respirasi, dan (5) efek IMT. Temuan dari masing-masing tema disintesis secara naratif dengan membandingkan

kesamaan, perbedaan, dan faktor moderasi antar studi. Artikel dari konteks Indonesia dianalisis secara khusus untuk mengidentifikasi kekhasan temuan dalam konteks populasi lokal dan implikasinya terhadap pengembangan program latihan di Indonesia.

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan proses seleksi literatur yang telah dilakukan, penulis mengumpulkan sejumlah sumber dari jurnal nasional dan internasional yang relevan dengan topik adaptasi sistem pernapasan terhadap aktivitas fisik pada atlet. Artikel-artikel ini kemudian dianalisis untuk menemukan kesamaan dalam temuan, perbedaan hasil, serta faktor-faktor yang berperan dalam adaptasi sistem pernapasan selama program latihan. Dari hasil penelusuran terhadap 10 artikel internasional dan beberapa penelitian dari Indonesia, ditemukan bahwa latihan fisik baik aerobik maupun latihan otot pernapasan (*Inspiratory Muscle Training/IMT*) berpengaruh signifikan terhadap peningkatan efisiensi sistem respirasi, kapasitas difusi paru, serta daya tahan fisik atlet.

Tabel 2 berikut menyajikan karakteristik metodologis masing-masing artikel secara terstruktur, mencakup jenis studi, populasi, variabel yang diukur, instrumen pengukuran, dan metode analisis data.

Tabel 2. Literatre Review Result					
No	Judul	Populasi/ Sampel	Variabel Utama	Instrumen	Analisis Data
1	<i>Pulmonary adaptations to endurance training</i> (Dominelli et al., 2024)	Atlet endurance dewasa	Adaptasi ventilasi, DLCO, EIAH	CPET, spirometri, analisis gas darah	Sintesis naratif
2	<i>Effects of endurance training intensity on pulmonary diffusing capacity at rest and after maximal aerobic exercise in young athletes</i> (Dridi et al., 2021)	32 atlet muda (18–25 thn)	DLCO/TLCO saat istirahat dan pasca-latihan	Spirometri, DLCO <i>single-breath</i>	ANOVA, uji-t berpasangan
3	<i>Hemoglobin mass and blood volume adaptations in athletes: A review</i> (Hauser et al., 2023)	Atlet berbagai cabang	Massa hemoglobin (Hb mass), volume plasma	CO-rebreathing, hemoksimetri	Sintesis naratif & meta-analisis
4	<i>Exercise-induced arterial hypoxemia: Some answers, more questions</i> (Dominelli, 2019)	Atlet endurance elite	EIAH, V/Q mismatch	Oksimetri pulse, analisis gas arteri	Analisis fisiologis naratif
5	<i>The effect of Inspiratory Muscle Training on health-related outcomes in young adults</i> (Qin et al., 2024)	60 dewasa muda aktif	MIP, FVC, FEV ₁ , dyspnea	Spirometri, manometer, skala Borg	ANCOVA, uji-t independen
6	<i>Effect of Inspiratory Muscle Training on pulmonary function and athletic performance</i> (de Freitas et al., 2024)	Atlet berbagai cabang	MIP, FVC, VO ₂ max, performa	Spirometri, PowerBreathe, CPET	Meta-analisis (random effects)
7	Status IMT dan kapasitas vital paru kaitannya dengan tingkat VO ₂ max atlet remaja (Ratnaya et al., 2024)	40 atlet remaja (Undiksha)	IMT status, kapasitas vital paru, VO ₂ max	Spirometri, tes bleep/multistage	Korelasi Pearson
8	Latihan pernapasan diafragma meningkatkan kapasitas paru-paru pada atlet Taekwondo putra di Club Dynasty TNI AL Denpasar, Bali (Nohantara & Putriyan, 2025)	20 atlet Taekwondo putra (Bali)	Kapasitas vital paru	Spirometri (peak flow meter)	Uji Wilcoxon
9	Korelasi kapasitas vital paru dengan prestasi atlet di Sekolah Olahraga Nasional Sriwijaya Palembang (Tanzila & Febriani, 2025)	45 atlet SONasional Sriwijaya	Kapasitas vital paru, prestasi atlet	Spirometri, rekam prestasi	Korelasi Spearman
10	<i>Effects of high-intensity interval training on respiratory efficiency in endurance athletes</i> (Torres-Peralta et al., 2022)	18 atlet endurance	Efisiensi ventilasi (VE/VCO ₂), VO ₂ max	CPET, analisis gas ekspirasi	ANOVA mixed model

Adaptasi Ventilasi

Respons ventilasi terhadap latihan berlangsung dalam tiga fase yang berurutan. Pada fase I, ventilasi meningkat segera sejak latihan dimulai akibat impuls neural dari korteks motorik dan proprioseptor otot, menyebabkan peningkatan volume tidal (VT) tanpa perubahan signifikan pada frekuensi napas (Dominelli et al., 2024; Powers & Howley, 2022). Fase II ditandai dengan peningkatan laju napas yang didorong oleh akumulasi CO₂ dan ion H⁺ dalam aliran darah. Pada fase III atau intensitas di atas enduranceventilatory threshold kedua (VT2), terjadi hiperventilasi kompensatoris untuk mempertahankan keseimbangan asam-basa (Torres-Peralta et al., 2022).

Adaptasi kronis akibat latihan aerobik jangka panjang menghasilkan peningkatan efisiensi ventilasi yang terukur melalui rasio $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$. Atlet *endurance* terlatih secara konsisten menunjukkan nilai $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ slope yang lebih rendah dibandingkan individu tidak terlatih, mengindikasikan eliminasi CO₂ yang lebih efisien per unit ventilasi (Kasiak et al., 2024; Squeo et al., 2025). Pada 443 atlet elite yang dievaluasi menjelang Olimpiade Paris 2024, atlet *endurance* laki-laki menunjukkan efisiensi ventilasi tertinggi dibandingkan cabang olahraga lain, dengan nilai $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ nadir yang secara signifikan lebih rendah (Squeo et al., 2025). Torres-Peralta et al. (2022) menambahkan bahwa HIIT secara khusus mampu memperbaiki efisiensi ventilasi pada atlet *endurance* melalui peningkatan sensitivitas kemoreseptor dan reduksi *dead space fungsional*.

Pergeseran *enduranceventilatory threshold* (VT1) ke intensitas yang lebih tinggi merupakan penanda adaptasi paling konsisten pada atlet terlatih (Collins et al., 2021; Dominelli et al., 2024). Pergeseran ini memungkinkan atlet mempertahankan steady state metabolik lebih lama sebelum ventilasi meningkat eksponensial, sehingga secara langsung berkontribusi pada peningkatan *time to exhaustion* (TTE) dan performa daya tahan.

Adaptasi Kapasitas Difusi Paru (DLCO/TLCO)

Latihan fisik teratur meningkatkan kapasitas difusi paru melalui mekanisme rekrutmen dan distensi kapiler alveolar yang memperluas permukaan pertukaran gas efektif. Dridi et al. (2021) membandingkan efek latihan *endurance* intensitas tinggi versus sedang pada 32 atlet muda dan menemukan bahwa kelompok intensitas tinggi mengalami peningkatan DLCO/TLCO yang lebih besar, baik pada kondisi istirahat maupun setelah latihan maksimal, terutama melalui perbaikan komponen membran difusi (Dm) dan volume kapiler paru (Vc). Temuan serupa dilaporkan oleh Nohantara & Putriyani (2025) yang membuktikan bahwa latihan pernapasan diafragma selama enam minggu secara signifikan meningkatkan kapasitas vital paru pada atlet Taekwondo, mengindikasikan bahwa intervensi berbasis kontrol pernapasan efektif tidak hanya pada olahraga ketahanan tetapi juga pada olahraga bela diri yang bersifat intermiten.

Fenomena *exercise-induced arterial hypoxemia* (EIAH) muncul sebagai batas fisiologis difusi yang sering dijumpai pada atlet *endurance* elite dengan VO₂maks sangat tinggi (>65–70 mL/kg/menit). Dominelli (2019) menjelaskan bahwa EIAH terjadi karena waktu transit eritrosit di kapiler paru menjadi terlalu singkat (< 0,25 detik) sehingga hemoglobin tidak mencapai saturasi penuh, diperparah oleh V/Q mismatch dan hipoventilasi relatif pada intensitas maksimal. Pemantauan SpO₂ dan pengukuran DLCO berkala disarankan sebagai alat skrining adaptasi difusi pada atlet elite (Dominelli, 2019; Dominelli et al., 2024).

Adaptasi Transportasi Gas

Di luar ventilasi dan difusi, latihan aerobik jangka panjang mendorong adaptasi hematologis yang memperbesar kapasitas angkut oksigen sistemik. Hauser et al. (2023) menemukan bahwa massa hemoglobin total (Hb mass) meningkat 10–20% pada atlet *endurance* terlatih dibandingkan populasi umum, dengan adaptasi ini bersifat proporsional terhadap volume latihan aerobik kumulatif. Peningkatan Hb mass ini secara langsung memperbesar kandungan oksigen arteri (CaO₂) dan VO₂maks (Hauser et al., 2023).

Studi korelasional di Indonesia oleh Tanzila & Febriani (2025) pada 45 atlet Sekolah Olahraga Nasional Sriwijaya menunjukkan korelasi positif yang signifikan antara kapasitas vital paru dan prestasi atlet ($r = 0,67$; $p < 0,05$), memperkuat argumen bahwa kapasitas respirasi merupakan prediktor performa yang valid dalam konteks atlet muda Indonesia. Penurunan hematokrit relatif yang sering diamati pada atlet (*sports anemia*) sebenarnya merupakan respons adaptif akibat ekspansi volume plasma yang lebih besar dari peningkatan massa eritrosit, sehingga tidak menggambarkan defisiensi besi sejati (Hauser et al., 2023; Powers & Howley, 2022).

Selama latihan intensitas tinggi, terjadi pula pergeseran kurva disosiasi oksigen–hemoglobin ke kanan (Bohr effect) akibat penurunan pH, peningkatan PCO_2 , dan kenaikan suhu otot, yang secara fungsional meningkatkan pelepasan O_2 ke jaringan aktif. Kapasitas buffer bikarbonat (HCO_3^-) yang meningkat pada atlet terlatih turut menunda akumulasi asam laktat dan mempertahankan stabilitas pH darah pada intensitas submaksimal (Powers & Howley, 2022).

Kontrol Saraf Respirasi dan Ambang Ventilasi

Latihan rutin memodifikasi sensitivitas kemoreseptor pusat dan perifer terhadap CO_2 dan H^+ , menghasilkan respons ventilasi yang lebih proporsional terhadap kebutuhan metabolik. Pada atlet terlatih, kendali ventilasi menjadi lebih efisien sehingga hiperventilasi berlebihan dapat dihindari pada intensitas submaksimal, berkontribusi pada penghematan kerja otot pernapasan dan redistribusi aliran darah ke otot rangka aktif (Collins et al., 2021; Dominelli et al., 2024). Pergeseran VT2 ke intensitas yang lebih tinggi mencerminkan kapasitas buffer metabolik yang lebih baik dan merupakan salah satu penanda fisiologis paling sensitif terhadap adaptasi latihan aerobik (Kasiak et al., 2024; Torres-Peralta et al., 2022).

Latihan Otot Pernapasan (*Inspiratory Muscle Training/IMT*)

IMT telah terbukti meningkatkan kekuatan otot inspirasi melalui mekanisme yang melibatkan hipertrofi otot, perubahan komposisi serat otot, peningkatan efisiensi kontrol neuromuskular, serta penundaan aktivasi *inspiratory muscle metaboreflex*, suatu refleks yang pada intensitas tinggi memicu vasokonstriksi otot rangka demi mempertahankan perfusi otot pernapasan (Al-Otaibi & Sartor, 2024; Langer et al., 2025). Dengan menunda refleks ini, IMT secara tidak langsung meningkatkan aliran darah ke otot lokomotor dan memperpanjang TTE.

Qin et al. (2024) dalam RCT pada 60 dewasa muda aktif membuktikan bahwa IMT selama 6–8 minggu meningkatkan MIP secara signifikan dan mengurangi persepsi *dyspnea* saat latihan. Ratnaya et al. (2024) pada 40 atlet remaja di Undiksha melaporkan korelasi positif signifikan antara status IMT, kapasitas vital paru, dan $\text{VO}_{2\text{maks}}$, menegaskan relevansi IMT dalam konteks pengembangan atlet muda Indonesia. Rożek-Piechura et al. (2025) pada pelari jarak menengah membuktikan bahwa IMT berbasis *PowerBreathe* secara signifikan meningkatkan VO_2/kg , kekuatan inspirasi, dan menurunkan akumulasi asam laktat, dengan efek yang lebih besar dibandingkan *threshold device*. Meskipun demikian, efek IMT terhadap parameter spirometri standar (FVC/FEV_1) tetap inkonsisten antar studi, dan de Freitas et al. (2024) dalam meta-analisisnya menyimpulkan bahwa IMT paling konsisten meningkatkan MIP dan TTE, tetapi efeknya pada $\text{VO}_{2\text{max}}$ atlet yang sudah terlatih masih diperdebatkan. Program IMT yang direkomendasikan untuk atlet adalah 5–6 sesi per minggu dengan intensitas 50–60% MIP menggunakan alat *threshold* atau *flow-resistive*, disertai evaluasi MIP/MEP berkala sebelum dan setelah periode intervensi untuk memantau progresivitas adaptasi (de Freitas et al., 2024; Kowalski et al., 2024).

Model Konseptual

Berdasarkan sintesis seluruh bukti yang dikaji, dapat diajukan model konseptual yang menggambarkan hubungan bertingkat antara jenis latihan, adaptasi respirasi, dan peningkatan performa atlet. Model ini menempatkan jenis latihan berdasarkan dominasi energi sebagai input utama: latihan aerobik (*endurance*) menghasilkan adaptasi ventilasi (efisiensi $\dot{V}_E/\dot{V}_{\text{CO}_2}$, pergeseran VT) dan adaptasi difusi-transportasi (peningkatan DLCO, Hb mass), sedangkan latihan anaerobik dan IMT secara dominan meningkatkan kekuatan otot inspirasi (MIP) serta menunda *metaboreflex*. Kedua jalur adaptasi ini bermuara pada output bersama, yakni peningkatan $\text{VO}_{2\text{max}}$, TTE, dan performa kompetitif. Faktor individual seperti genetik, usia, jenis kelamin, dan ketinggian tempat tinggal berperan sebagai moderator yang memengaruhi besaran adaptasi (Bouchard & Hoffman, 2011; Squeo et al., 2025).

Model ini memiliki implikasi penting: bahwa optimasi performa respirasi tidak dapat dicapai hanya melalui satu modalitas latihan, melainkan membutuhkan pendekatan terintegrasi yang menggabungkan latihan aerobik, HIIT, dan IMT secara terprogram sesuai fase kompetisi dan profil individu atlet (de Freitas et al., 2024; Kowalski et al., 2024).

Implikasi Ilmiah dan Praktis

Kajian ini memperkuat konsep bahwa sistem respirasi bukan faktor pembatas tunggal dalam performa atlet, melainkan berinteraksi secara dinamis dengan sistem kardiovaskular dan

muskuloskeletal dalam satu rantai pengiriman oksigen yang terintegrasi (Collins et al., 2021; Dominelli et al., 2024). Temuan bahwa EIAH dapat muncul pada atlet dengan VO_{2max} tertinggi mengisyaratkan adanya ceiling effect pada kapasitas difusi paru yang tidak dapat diatasi semata-mata melalui latihan aerobik, sehingga membuka pertanyaan ilmiah baru mengenai batas fisiologis adaptabilitas paru-paru (Dominelli, 2019). Lebih jauh, inkonsistensi efek IMT pada VO_{2max} dan FVC/FEV_1 di berbagai studi mengindikasikan perlunya penelitian dengan desain yang lebih terkontrol, populasi atlet yang lebih homogen, serta pengukuran multi-parameter yang mencakup DLCO, MIP, dan *metaboreflex* secara bersamaan, sebuah gap yang terutama relevan dalam konteks riset olahraga di Indonesia (de Freitas et al., 2024; Ratnaya et al., 2024).

Bagi praktisi olahraga dan pelatih di Indonesia, temuan kajian ini mendukung integrasi IMT ke dalam program latihan atlet, khususnya pada cabang olahraga yang menuntut kapasitas ventilasi tinggi seperti renang, lari jarak jauh, dan bela diri. Protokol yang direkomendasikan adalah latihan aerobik terstruktur dikombinasikan dengan sesi IMT (50–60% MIP, 5–6x/minggu) yang dimulai pada fase persiapan umum dan dipantau menggunakan spirometri serta pengukuran MIP/MEP secara berkala (de Freitas et al., 2024; Kowalski et al., 2024). Monitoring SpO_2 selama sesi latihan intensitas tinggi juga dianjurkan untuk mendeteksi kemungkinan EIAH pada atlet *endurance* elite (Dominelli, 2019).

Berdasarkan tinjauan pustaka, ringkasan perbandingan adaptasi sistem pernapasan antara individu yang tidak terlatih dan yang terlatih ditampilkan pada table di bawah ini:

Tabel 3. Ringkasan Adaptasi Sistem Respirasi pada Atlet Terlatih dan Tidak Terlatih				
No	Komponen Respirasi	Individu Tidak Terlatih	Atlet Terlatih	Referensi
1	Frekuensi Napas (RR)	Lebih tinggi (20-30 kali/menit)	Lebih rendah (10-20 kali/menit), Pernapasan lebih dalam dan efisien	(Dominelli et al., 2024)
2	Volume Tidal (VT)	± 1-1.5 L	±2-3 L, Peningkatan volumen inspirasi per napas	(Dominelli et al., 2024)
3	Ventilasi Menit (VE)	Relatif tinggi pada beban submaksimal	Lebih rendah (efisiensi ventilasi meningkat)	(Dominelli et al., 2024)
4	Kapasitas Difusi Paru (DLCO/TLCO)	Normal	Meningkat 10–20% akibat rekrutmen kapiler dan perfusi alveolar lebih baik	(Dridi et al., 2021)
5	Massa Hemoglobin (Hb Mass)	Normal	Lebih tinggi (±10–20%); meningkatkan kapasitas angkut O_2	(Hauser et al., 2023)
6	Risiko <i>Exercise-induced arterial hypoxemia</i> (EIAH)	Jarang Terjadi	Dapat terjadi pada atlet elite <i>endurance</i>	(Dominelli et al., 2024)
7	Efek <i>Inspiratory Muscle Training</i> (IMT)	Tidak Signifikan	Meningkatkan tekanan inspirasi maksimal (MIP) dan efisiensi pernapasan	(de Freitas et al., 2024; Qin et al., 2024)

Berdasarkan tabel yang di atas, terlihat bahwa berolahraga secara teratur dapat meningkatkan efisiensi sistem pernapasan melalui berbagai cara fisiologis, mencakup peningkatan ventilasi, kapasitas difusi, serta penguatan otot pernapasan. Oleh karena itu, gabungan antara latihan aerobik dan pelatihan otot pernapasan (IMT) terbukti menjadi metode yang paling ampuh dalam memperbaiki kinerja pernapasan atlet dan memaksimalkan fungsi sistem kardipulmoner.

4. Kesimpulan

Kajian ini menyimpulkan bahwa adaptasi sistem respirasi terhadap program latihan fisik pada atlet bersifat multidimensi, berlangsung secara bertingkat, dan sangat dipengaruhi oleh kategorisasi dominasi energi latihan aerobik atau anaerobik serta karakteristik individual atlet. Tiga lapisan adaptasi utama yang teridentifikasi, yakni ventilasi, difusi paru, dan transportasi gas, tidak bekerja secara terpisah melainkan membentuk satu sistem terintegrasi dalam rantai pengiriman oksigen dari atmosfer menuju mitokondria otot aktif.

Latihan aerobik jangka panjang terbukti menghasilkan adaptasi ventilasi yang paling konsisten, ditandai dengan peningkatan efisiensi $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$, pergeseran *enduranceventilatory threshold* ke intensitas yang lebih tinggi, dan reduksi ventilasi menit pada beban submaksimal. Adaptasi ini secara langsung memperpanjang *time to exhaustion* dan mendukung performa pada

cabang olahraga ketahanan. Pada level difusi, latihan intensitas tinggi meningkatkan DLCO/TLCO melalui rekrutmen kapiler alveolar dan pemerataan perfusi, meskipun pada atlet *endurance* elite adaptasi ini dapat mencapai batasnya sehingga memunculkan fenomena EIAH sebagai manifestasi keterbatasan fisiologis paru-paru. Pada level transportasi, peningkatan massa hemoglobin (10–20%) dan ekspansi volume plasma memperbesar kapasitas angkut oksigen, didukung oleh Bohr effect dan peningkatan kapasitas buffer bikarbonat yang bersama-sama mempertahankan homeostasis asam-basa selama latihan berat.

Intervensi IMT terbukti melengkapi adaptasi yang tidak dapat dicapai semata-mata melalui latihan aerobik, yaitu peningkatan kekuatan otot inspirasi (MIP), penundaan inspiratory muscle metaboreflex, dan redistribusi aliran darah ke otot rangka aktif. Bukti dari konteks atlet Indonesia mencakup atlet taekwondo di Bali, atlet remaja di Undiksha, dan atlet Sekolah Olahraga Nasional Sriwijaya, secara konsisten menunjukkan korelasi positif antara kapasitas respirasi dan performa, sekaligus memvalidasi penerapan IMT dalam konteks pembinaan atlet lokal.

Secara ilmiah, kajian ini menegaskan perlunya pendekatan terintegrasi yang menggabungkan latihan aerobik, HIIT, dan IMT dalam satu program terprogram berbasis fase kompetisi dan profil individual atlet. Penelitian lanjutan dengan desain terkontrol yang mengukur ventilasi, DLCO, dan *metaboreflex* secara bersamaan khususnya pada populasi atlet Indonesia sangat dibutuhkan untuk mengisi kesenjangan bukti yang masih ada dan mengembangkan pedoman latihan respirasi berbasis data lapangan nasional.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Universitas Negeri Yogyakarta atas kesempatan dan dukungan yang diberikan, sehingga penulis dapat menyelesaikan artikel ini dengan baik. Rasa terima kasih juga ditujukan kepada orang tua dan semua pihak yang telah memberikan dukungan, semangat, dan doa selama proses penyusunan hingga penyelesaian artikel ini.

Daftar Pustaka

- Al-Otaibi, H. M., & Sartor, F. (2024). The influence of low resistance respiratory muscle training on pulmonary function and high intensity exercise performance. *Journal of Exercise Science & Fitness*, 22(3), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2024.02.007>
- Atakan, M. M., Li, Y., Koşar, Ş. N., Turnagöl, H. H., & Yan, X. (2021). Evidence-based effects of high-intensity interval training on exercise capacity and health: A review with historical perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(13), 7201. <https://doi.org/10.3390/ijerph18137201>
- Bouchard, C., & Hoffman, E. P. (2011). *Genetic and Molecular Aspects of Sports Performance*. Wiley-Blackwell.
- Brotto, A. R., Dominelli, P. B., & Sheel, A. W. (2024). Impact of body posture on pulmonary diffusing capacity at rest and during exercise in endurance-trained and untrained individuals. *Journal of Applied Physiology*. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00447.2024>
- Carvajal-Tello, N., Acero-Mondragón, E. J., & Barrero-Sossa, C. A. (2024). Effects of Inspiratory Muscle Training on lung function parameters in swimmers: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Sports and Active Living*, 6. <https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1429902>
- Collins, S. É., Terada, T., Kodama, S., Marillier, M., Bernard, A. C., O'Halloran, K. D., Bhambhani, Y., & Stickland, M. K. (2021). Ventilatory efficiency in athletes, asthma and obesity. *European Respiratory Review*, 30(161), 210051. <https://doi.org/10.1183/16000617.0051-2021>
- de Freitas, J. P., Ferreira, A. S., & Costa, D. (2024). Effect of Inspiratory Muscle Training on pulmonary function and athletic performance. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 323, 105464. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2024.105464>
- Dominelli, P. B. (2019). Exercise-induced arterial hypoxemia: Some answers, more questions. *The Journal of Physiology*, 597(24), 5573–5574. <https://doi.org/10.1113/JP278967>
- Dominelli, P. B., Sheel, A. W., & Foster, G. E. (2024). Pulmonary adaptations to endurance training. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 52(1), 15–27. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000421>
- Dridi, R., Vinet, A., Hayot, M., & Prefaut, C. (2021). Effects of endurance training intensity on pulmonary diffusing capacity at rest and after maximal aerobic exercise in young athletes. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 288, 103627. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2021.103627>

Ferrari, R. (2015). Writing narrative style literature reviews. *Medical Writing*, 24(4), 230–235. <https://doi.org/10.1179/2047480615Z.000000000329>

García, I., Peinado, A. B., Álvarez-Herms, J., & Cirer-Sastre, R. (2021). Pulmonary diffusing capacity in swimmers: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 2106. <https://doi.org/10.3390/ijerph18042106>

Hauser, T., Schumacher, Y. O., & Lundby, C. (2023). Hemoglobin mass and blood volume adaptations in athletes: A review. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5, 1182451. <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1182451>

Kasiak, P., Kowalski, T., Rębiś, K., Śliż, D., & Mamcarz, A. (2024). Is the ventilatory efficiency in endurance athletes different? Findings from the NOODLE Study. *Journal of Clinical Medicine*, 13(2), 490. <https://doi.org/10.3390/jcm13020490>

Kowalski, T., Granda, D., & Klusiewicz, A. (2024). Comparative study of different respiratory muscle training methods: Effects on cardiopulmonary indices and athletic performance in elite short-track speedskaters. *Life*, 14(9), 1159. <https://doi.org/10.3390/life14091159>

Langer, D., Charususin, N., Jacome, C., Hoffman, M., McConnell, A., Decramer, M., & Gosselink, R. (2025). The effect of Inspiratory Muscle Training on the inspiratory muscle metaboreflex: A systematic review. *PLoS ONE*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11955241/>

Nohantara, M. A., & Putriyani, P. S. (2025). Latihan pernapasan diafragma meningkatkan kapasitas paru-paru pada atlet Taekwondo putra di Club Dynasty TNI AL Denpasar, Bali. *Prepotif: Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 7(1). <https://doi.org/10.31004/prepotif.v7i1.13326>

Powers, S. K., & Howley, E. T. (2022). *Exercise Physiology: Theory and Application to Fitness and Performance* (11th ed.). McGraw-Hill Education.

Qin, L., Zhang, Y., & Wang, H. (2024). The effect of Inspiratory Muscle Training on health-related outcomes in young adults: A randomized controlled trial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(8), 1088. <https://doi.org/10.3390/ijerph21081088>

Ratnaya, I. G., Kusuma, C. A., & Andika, I. P. H. W. (2024). Status IMT dan kapasitas vital paru kaitannya dengan tingkat VO₂max atlet remaja. *Jurnal Ilmu Keolahragaan Undiksha*, 12(1), 30–36. <https://doi.org/10.23887/jiku.v12i1.68843>

Rożek-Piechura, K., Kurzaj, M., Stefańska, M., Przepiórkowski, J., & Woźniewski, M. (2025). Inspiratory Muscle Training included in therapeutic and training regimens for middle-distance runners. *Journal of Clinical Medicine*, 14(9), 3180. <https://doi.org/10.3390/jcm14093180>

Squeo, M. R., Pelliccia, A., Maestrini, V., Fusco, A., Lemme, E., Mango, F., & Spataro, A. (2025). Exercise ventilatory efficiency in elite athletes assessed for the Paris 2024 Olympic Games. *Physiological Reports*, 13, e70261. <https://doi.org/10.14814/phy2.70261>

Striga, S. I. (2024). The impact of aerobic and anaerobic exercises on human physical development. *Psychological and Pedagogical Problems of Human and Social Security*, (1), 23–30.

Tanzila, R. A., & Febriani, R. (2025). Korelasi kapasitas vital paru dengan prestasi atlet di Sekolah Olahraga Nasional Sriwijaya Palembang. *Syifa' Medika: Jurnal Kedokteran Dan Kesehatan*. <https://doi.org/10.46772/jigk.v5i1.1259>

Torres-Peralta, R., Losa-Reyna, J., González-Izal, M., Morán-Navarro, R., Pérez-Suárez, I., Izquierdo, M., & Calbet, J. A. L. (2022). Effects of high-intensity interval training on respiratory efficiency in endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 122(4), 891–904. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04873-2>

Authors Information	
Irvan Abdillah (1) Sport Science Department, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia Email: irvanabdillah.2025@student.uny.ac.id	Arif Wicaksono (2) Sport Science Department, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia Email: arifwicaksono.2025@student.uny.ac.id
Panggung Sutapa (3) Sport Science Department, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia Email: panggung_@uny.ac.id	Prijo Subdibjo (4) Sport Science Department, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia Email: prijo_subdibyo@uny.ac.id